

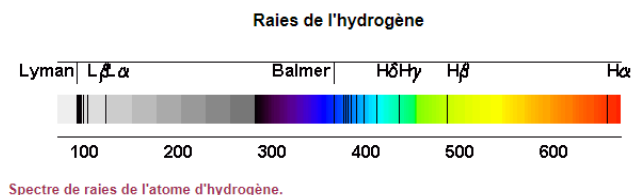
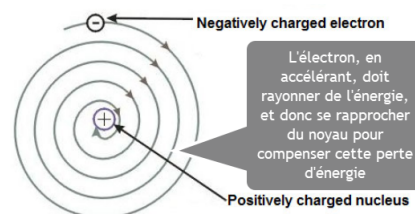
20.1 Un peu d'histoire des sciences

En 1911, Ernest Rutherford montra l'existence d'un très petit noyau chargé positivement, ce qui le conduisit par la suite à proposer le modèle atomique de Rutherford : un atome est constitué d'électrons négatifs qui orbitent sur des trajectoires circulaires autour d'un noyau dense positif, à la manière des planètes du système solaire qui orbitent de manière quasi circulaire autour du Soleil, la force électromagnétique remplaçant alors la force de gravitation. Toutefois, la théorie planétaire de Rutherford se heurtait à la théorie du rayonnement de l'électron accéléré.

En effet, d'après les observations expérimentales et les lois de Maxwell, un électron soumis à une accélération émet de l'énergie sous forme de champ électromagnétique. Ramené au niveau de l'atome de Rutherford, l'électron devrait décrire une spirale convergente, et non un cercle, pour finir par s'écraser sur le noyau. Les orbites ne sont donc pas stables.

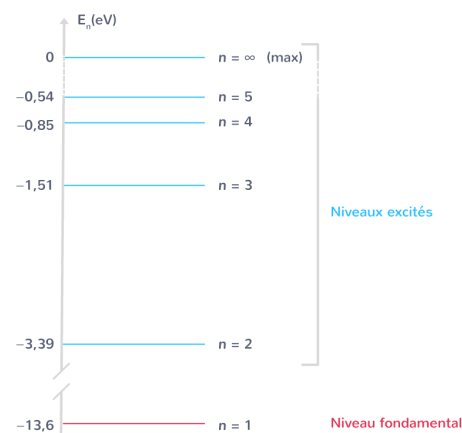
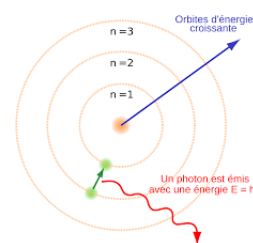
Si le modèle planétaire de Rutherford était valide, le spectre d'émission de l'hydrogène devrait être un continuum : c'est-à-dire qu'il devrait présenter l'ensemble des longueurs d'onde accessibles, un arc-en-ciel en somme.

La réalité est tout autre, car le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène est un spectre de raies :



Crédit : ASM

En 1913, le physicien danois **Niels Bohr** suppose qu'il existe des **orbites circulaires stables pour les électrons**, c'est-à-dire qu'une fois sur une de ces orbites, l'électron ne rayonne aucune énergie électromagnétique. Il ne décroît donc pas en spirale et peut rester indéfiniment sur cette orbite. Il élabore alors un **modèle quantique de l'atome** où ces orbites stables sont nommées **couches électroniques**.



♥ À retenir

Le terme **mécanique quantique** provient du fait que dans ce modèle, les couches électroniques possèdent une **énergie bien définie** : elle est **quantifiée**. Un électron ne peut donc uniquement se situer que sur des niveaux d'énergie bien précis.

Se penchant sur l'interprétation du spectre de raies de l'hydrogène, le physicien danois Niels Bohr corrigea en 1913 le modèle planétaire proposé par Rutherford quelques années auparavant. Il ébauche ainsi le premier modèle de l'atome dérivant des récentes théories quantiques.

20.2 Le photon et l'interaction lumière-matière

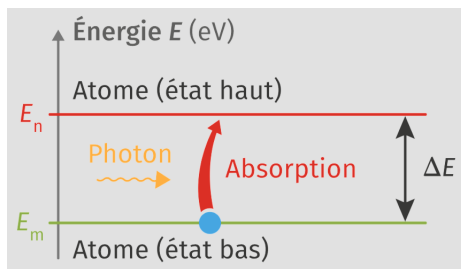
Σ ♥ Formule à connaître

Le photon émis, que l'on peut traduire par « grain de lumière », possède une énergie :

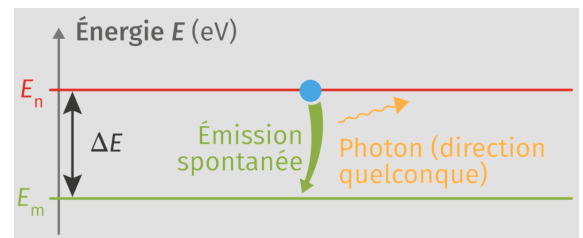
$$|\Delta E| = h\nu$$

avec :

- ΔE la différence d'énergie entre deux couches électroniques en joule (J), mais souvent exprimée en électronvolt (eV) ;
- h la constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;
- ν se lit « nu » et correspond à la fréquence de l'onde en hertz (Hz). Souvent ν est notée f .



Absorption : lorsqu'un électron au sein d'un atome absorbe un photon, son énergie passe d'un niveau d'énergie initial E_i à un état d'énergie final supérieur E_f .



Émission : lorsqu'un électron au sein d'un atome passe d'un niveau d'énergie initial E_i à un état d'énergie final inférieur E_f , il émet un photon dont l'énergie est égale à la différence d'énergie :

$$|\Delta E| = |E_f - E_i| = h\nu$$

Sachant que $\nu = \frac{1}{T}$ et que $c = \frac{\lambda}{T}$, la relation de Planck-Einstein se met également sous la forme :

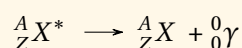
$$|\Delta E| = \frac{hc}{\lambda}$$

Plus la longueur d'onde λ est faible, plus l'énergie d'un photon est élevée. Les UV sont, par exemple, plus énergétiques que les IR, d'où leur dangerosité accrue.

📎 Remarque

On a déjà évoqué la désexcitation des noyaux dans le chapitre sur la radioactivité sous le nom de désexcitation γ (dans le cas où la fréquence du photon émis est dans le domaine des ondes gamma) :

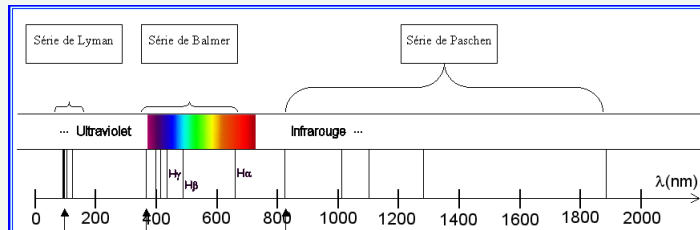
La plupart des noyaux issus d'une désintégration radioactive sont dans un état excité (souvent noté par une étoile). Le retour à leur état fondamental s'accompagne de l'émission d'un photon γ d'énergie $h\nu$:



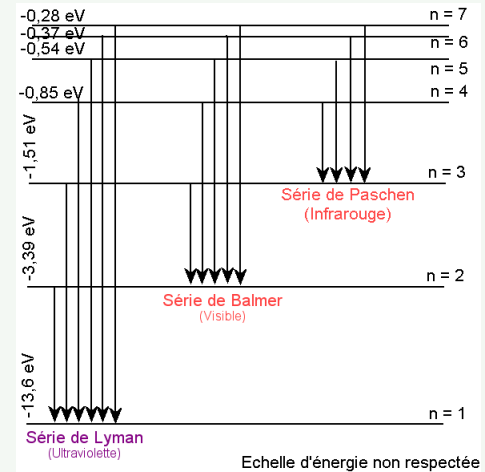
La charge et la masse du photon sont nulles : A et Z sont inchangés.

20.2.1 Exemple : spectre d'émission et transitions énergétiques au sein de l'atome d'hydrogène

✓ Exemple



On cherche à déterminer la longueur d'onde λ du photon émis lors de la désexcitation d'un atome d'hydrogène du niveau 3 vers le niveau 2.



$$|\Delta E| = |E_f - E_i| = |-3,39 - (-1,51)| = 1,88 \text{ eV}$$

L'électronvolt (eV) est une unité d'énergie couramment utilisée lorsqu'on travaille au niveau atomique. Il ne faut pas oublier de convertir en joule afin d'utiliser la formule de Planck-Einstein. La conversion vous sera toujours fournie en exercice. ($1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$)

$$|\Delta E| = 1,88 \text{ eV} = 1,88 \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J} = 3,01 \times 10^{-19} \text{ J}$$

La longueur d'onde du photon émis est donc de :

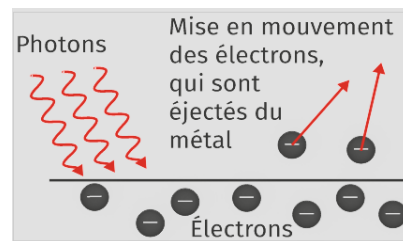
$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{3,01 \times 10^{-19} \text{ J}} = 6,60 \times 10^{-7} \text{ m} = 660 \text{ nm}$$

Lors de la désexcitation d'un atome d'hydrogène du niveau 3 vers le niveau 2, il émet un photon d'une longueur d'onde égale à 660 nm, qui est un photon dans le domaine du visible, de couleur rouge. Cette raie se nomme H_α et elle est très souvent observée lorsqu'on disperse la lumière émise par les étoiles. C'est par exemple sur cette raie que l'on travaille avec l'effet Doppler afin de mesurer des redshifts ou des blueshifts.

20.3 L'effet photoélectrique

En 1873, W. Smith observe que la résistance électrique du sélénium varie en fonction de l'intensité de la lumière reçue. Par la suite, Day et Adams découvrent qu'on peut créer un courant électrique à partir de sélénium éclairé. En 1883, Fritts met au point le premier panneau photovoltaïque mais personne n'arrive à expliquer clairement le phénomène mis en jeu.

- **Einstein postule en 1905** que toute onde électromagnétique de fréquence ν est en réalité un flux de quanta d'énergie, chaque quantum ayant une énergie $h\nu$ (notion de photon).
- **Lorsqu'un photon entre en collision avec un électron présent dans un métal, il lui transmet toute son énergie.**
- Si cette énergie est suffisante, alors l'électron est arraché. L'énergie minimale nécessaire pour arracher un électron est appelée **travail d'extraction** W_e .
- Si l'énergie est supérieure au travail d'extraction, alors le surplus d'énergie fourni est converti en énergie cinétique E_c .

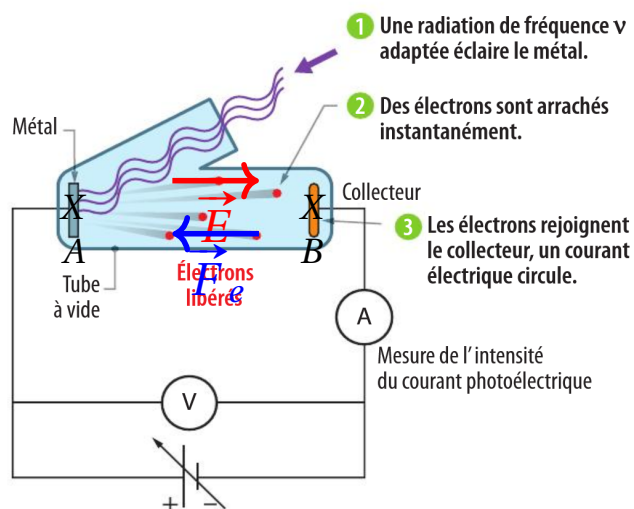


♥ À retenir

La nature de la lumière fut l'objet d'un intense débat historique. Aujourd'hui, on s'accorde à dire que la lumière est à la fois une onde et un flux de photons : c'est ce qu'on appelle la **dualité onde-corpuscule**. Le photon est la particule élémentaire associée aux ondes électromagnétiques dont la lumière fait partie. Il n'a pas de masse et ne porte pas de charge électrique. Dans le vide, sa vitesse est égale à :

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

20.3.1 Détermination du travail d'extraction pour le sodium



Pour déterminer les caractéristiques photoélectriques du sodium, on réalise le montage ci-contre.

On étudie une photocathode en sodium (partie « métal » sur le schéma). L'expérience consiste à éclairer cette photocathode par un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 430 \text{ nm}$. Des électrons sont émis du métal vers le collecteur avec une vitesse v_A . Il est possible, à l'aide du générateur, d'appliquer une tension électrique qui va créer un champ électrique entre les deux plaques. Ce champ électrique va induire une force électrique $\vec{F}_e$ sur les électrons, force qui sera opposée à leur mouvement. Cette force va donc freiner les électrons. Le but est de chercher pour quelle tension appliquée les électrons arrivent avec une vitesse nulle sur le collecteur. On repère cette valeur par l'absence de courant électrique qui circule alors dans le circuit. Cette valeur de tension est appelée « tension d'arrêt ». On obtient une tension d'arrêt $U_0 = 0,49 \text{ V}$.

Données :

- Masse de l'électron : $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
- Charge élémentaire : $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Intensité de pesanteur : $g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$
- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Calcul de la vitesse de l'électron émis

Comme vu lors du chapitre « Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme », le poids d'un électron est négligeable devant la force électrique qu'il subit dans un condensateur. Le travail de la force électrique est :

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \vec{AB} = -e \vec{E} \cdot \vec{AB} = -e E \times AB \times \cos(0) = -e E \times AB$$

Or, la relation entre la tension aux bornes d'un condensateur U , l'intensité du champ électrique E généré entre ses armatures et la distance AB entre elles est : $E = \frac{U}{AB}$. On a donc

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) = -e U_0$$

En appliquant le théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta E_c = \sum W_{AB}(\vec{F})$$

$$\Leftrightarrow 0 - \frac{1}{2} m v_A^2 = -e U_0$$

La vitesse d'un électron extrait du métal est donc :

$$v_A = \sqrt{\frac{2 e U_0}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ C} \times 0,49 \text{ V}}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = \boxed{4,15 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

Détermination de la longueur d'onde seuil λ_0

À retenir

Si l'on réalise un bilan d'énergie sur le système étudié : l'énergie incidente est le photon envoyé sur le métal. Une partie de cette énergie est utilisée pour extraire l'électron du métal (travail d'extraction), l'autre partie est convertie en énergie cinétique de l'électron. On a donc :

$$h\nu = W_e + E_c$$

$$\frac{hc}{\lambda} = W_e + E_c$$

Le travail d'extraction W_e se calcule à l'aide de la formule :

$$W_e = \frac{hc}{\lambda_0}$$

En effet, cela correspond à l'énergie minimale apportée par le photon pour arracher l'électron sans excédent qui serait converti en énergie cinétique ($E_c = 0$).

D'après la relation traduisant la conservation de l'énergie, il vient que :

$$W_e = \frac{hc}{\lambda} - E_c = \frac{hc}{\lambda} - \frac{1}{2} m v_A^2$$

Application numérique :

$$W_e = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{430 \times 10^{-9} \text{ m}} - \frac{1}{2} \times 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg} \times (4,15 \times 10^5)^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 3,83 \times 10^{-19} \text{ J}$$

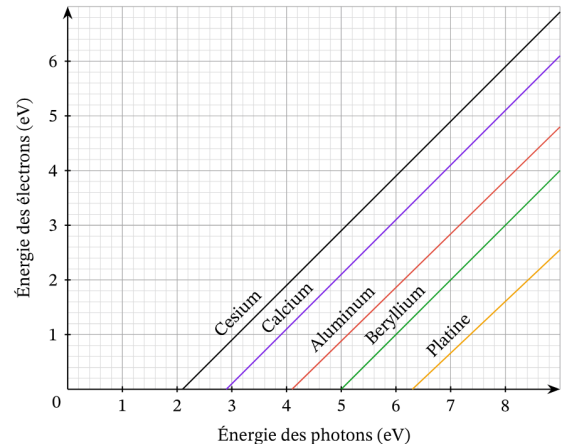
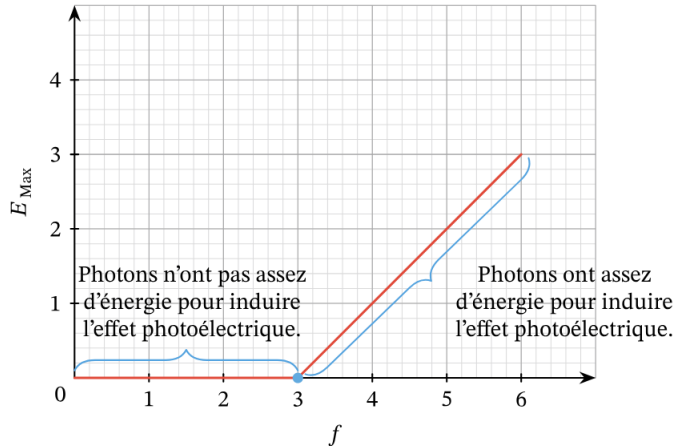
La longueur d'onde seuil est donc de :

$$\lambda_0 = \frac{hc}{W_e} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{3,83 \times 10^{-19} \text{ J}} = 5,19 \times 10^{-7} \text{ m} = \boxed{519 \text{ nm}}$$

20.3.2 Signification de ce résultat

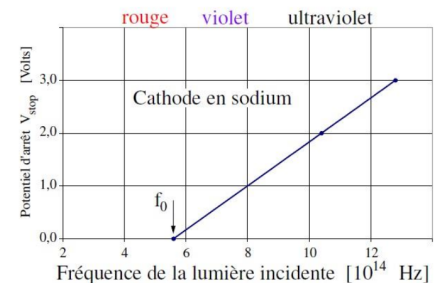
Cette longueur d'onde constitue la valeur seuil : si l'on éclaire la photocathode en sodium avec des photons de longueur d'onde supérieure à cette valeur de 519 nm (et donc d'énergie plus faible), il ne se passera rien ; aucun électron ne sera arraché du métal.

Si au contraire on éclaire la photocathode en sodium avec une source de longueur d'onde inférieure à cette valeur (et donc d'énergie plus grande), des électrons seront extraits. Plus la valeur de λ sera faible, plus l'énergie cinétique des électrons émis sera grande, ce qui traduit toujours la relation de conservation de l'énergie.



Chaque métal a une longueur d'onde seuil différente. C'est notamment pour cette raison que le silicium est utilisé dans les panneaux solaires : sa longueur d'onde seuil est « adaptée » à l'utilisation qu'on en fait.

Pour le sodium, sa longueur d'onde seuil de 519 nm correspond à une fréquence de $\nu = \frac{c}{\lambda_0} = 5,79 \times 10^{14}$ Hz. C'est bien ce que l'on retrouve sur le schéma ci-contre. Si l'énergie des photons incidents est trop faible : pas d'extraction.



Remarque

Les graphiques fournis correspondent la plupart du temps à $E_c = f(\nu)$. D'après la relation de conservation de l'énergie, l'équation de cette droite est donc : $E_c = h\nu - W_e$. On retrouve donc comme coefficient directeur la constante de Planck h (voir schéma en haut à droite : toutes les pentes sont identiques) et comme ordonnée à l'origine : $-W_e$.

20.4 Les panneaux solaires

20.4.1 Principe de fonctionnement

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de **matériaux semi-conducteurs**, l'un présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

- Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n (négatif), car les électrons (de charge négative) sont excédentaires.
- L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p (positif) en raison du déficit d'électrons ainsi créé.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

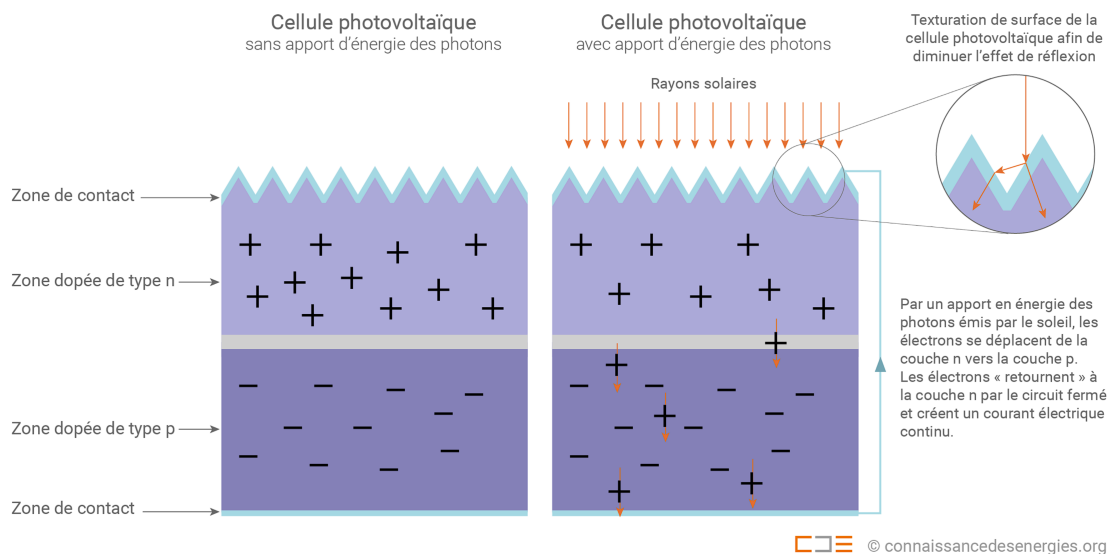


Schéma représentant la constitution d'une cellule photovoltaïque (Connaissance des Énergies, d'après CEA)

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, **les électrons empruntent ensuite un circuit** pour retourner à la couche n. Ce déplacement d'électrons n'est autre que le courant électrique produit par la cellule.

20.4.2 Rendement

Σ ♥ Formule à connaître

Le rendement d'une cellule correspond à la puissance électrique qu'elle fournit par rapport à la puissance lumineuse reçue :

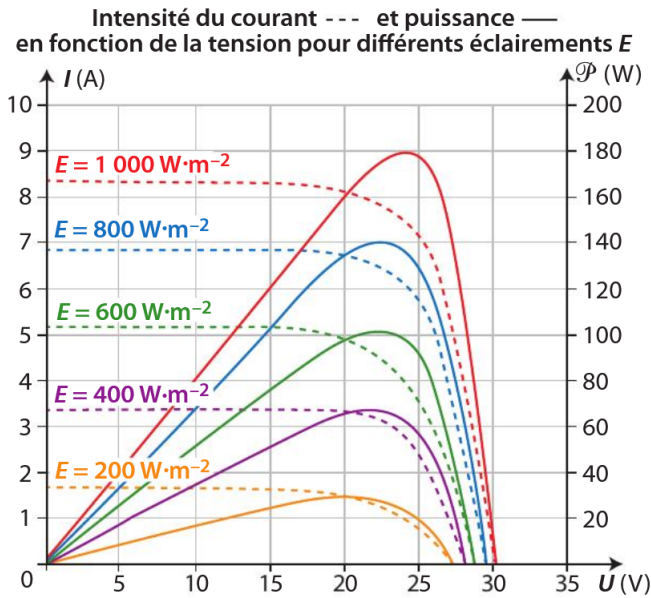
$$\eta = \frac{P_{\text{élec}}}{P_{\text{lum}}}$$

Ce rendement, compris entre 0 et 1, est bien sûr sans unité et s'exprime souvent en pourcentage. Attention à bien avoir les mêmes unités pour la puissance. Le rendement moyen d'une cellule photovoltaïque est de l'ordre de 15 %.

Exemple : calcul du rendement d'un panneau photovoltaïque

B Extrait de la notice d'un panneau photovoltaïque

- Panneau de 48 cellules associées en série.
- Dimensions du panneau : 1 318 mm × 994 mm.



Travaillons sur l'éclairement de $1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Par lecture graphique, on voit qu'un panneau photovoltaïque libère une puissance électrique de 180 W. La puissance lumineuse par unité de surface qu'il reçoit est de $E = 1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Surface du panneau :

$$S = L \times \ell = 1318 \times 10^{-3}\text{ m} \times 994 \times 10^{-3}\text{ m} = 1,31\text{ m}^2$$

La puissance lumineuse reçue par la cellule est donc de :

$$P_{\text{lum}} = E \times S = 1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \times 1,31\text{ m}^2 = 1310\text{ W}$$

Le rendement est donc de :

$$\eta = \frac{P_{\text{elec}}}{P_{\text{lum}}} = \frac{180\text{ W}}{1310\text{ W}} = 0,137 = \boxed{13,7\%}$$

Maîtrise				
Compétence				
Décrire l'évolution historique du modèle de l'atome.				
Connaître la relation de Planck-Einstein reliant l'énergie d'un photon à la fréquence ou à la longueur d'onde.				
Identifier un phénomène d'absorption ou d'émission de photon.				
Expliquer le principe de l'effet photoélectrique.				
Déterminer le travail d'extraction d'un métal à partir de données expérimentales.				
Calculer le rendement d'une cellule photovoltaïque.				